石羊河流域归一化植被指数变化及其驱动因子分析

杨晓玲[1,2]， 丁文魁[1]， 周 华[1]， 李岩瑛[1]， 陈海贝[3]

（1. 武威国家气候观象台，甘肃 武威 733099；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，甘肃 兰州 730020；3. 甘肃省古浪县气象局，甘肃 武威 733100）

摘 要：石羊河流域土地荒漠化问题严重，生态环境十分脆弱。以石羊河流域2000—2020年逐月NASA GIMMS归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）、气温、降水量、日照时数和蒸发量等资料为基础，采用趋势斜率、累积距平和信噪比、相关系数、多元回归等方法，分析研究了石羊河流域的植被指数变化及驱动因子。结果表明：（1）受海拔高度、地形地貌和气候差异的影响，石羊河流域NDVI的空间分布为上游>全流域>中游>下游。（2）全流域及上、中游年NDVI呈明显增长趋势，下游呈轻微增长趋势，趋势斜率为上游>全流域>中游>下游，各季节NDVI也呈增长趋势，夏、秋、冬季基本为明显增长。全流域及上、中、下游年NDVI在2010年或2011年发生了突变。（3）影响石羊河流域NDVI变化的气候因子依次为降水量、气温、蒸发量、日照时数。石羊河流域NDVI变化是气候变化与人类活动共同驱动的结果，全流域及上游气候因子对NDVI的贡献率比人类活动大，中、下游气候因子和人类活动对NDVI贡献相当。突变后人类活动的贡献率比突变前明显增大，气候因子的贡献率相对削弱。研究结果可为石羊河流域植被恢复及生态环境保护提供科学依据。

关 键 词：NDVI；趋势斜率；驱动因子；多元回归；石羊河流域
文章编号：1000－6060(2024)10－1735－10(1735～1744)

覆盖地表的植物群落总称为植被，是陆地生态系统的主体之一[1]。植被在陆地的能量交换、水循环和地球生物化学循环过程中承担着重要的生态角色，在全球气候稳定、碳的收支平衡等方面起着重要作用[2-3]。归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）是研究植被覆盖度与生长状况的遥感因子，其变化趋势可反映植被覆盖的变化程度，是衡量地表植被长势和评价区域生态系统健康程度的重要指标[4-6]。国外学者研究表明，在全球气候变暖背景下，气候变化已造成了全球性生态环境和生物资源的破坏[7]，导致局部地区植被覆盖发生显著变化[8]，北半球中高纬度地区植被活动呈显著增强[9]，特别是亚洲和北美40°~70°N地区植被变化呈显著的线性增加趋势[10]。国内学者研究发现，随着气候由暖干向暖湿转型[11]，中国大部分地区的植被活动也呈增强趋势[12-14]，其主要原因是全球变暖引起的植物生长季提前或延长了[15-17]。另外，人类活动也是植被变化的驱动因子之一，近年来，随着我国一系列生态工程的开展和实施，人类活动对植被覆被变化的影响越来越明显[18]。因此，在研究气候变化对植被变化影响的同时，人类活动的影响也不可或缺。

石羊河流域属于西北干旱地区，处于气候变化的敏感区和自然生态环境的脆弱区[19-21]，是西北干旱区内陆河流域中人口最密集、水资源开发强度最大、生态环境最脆弱、土地荒漠化最严重的地区之一，既属于西北绿洲，又属于北方农牧交错带的典型区，下游还孕育着民勤县荒漠区[22]，其植被覆盖

收稿日期：2024-01-17； **修订日期：**2024-02-29
基金项目：国家自然科学基金（41975015，41775107，42175192）；甘肃省气象局气象科研项目（人才专项）（GSMArc2019-02）资助
作者简介：杨晓玲（1971-），女，高级工程师，主要从事气候变化及生态农业等方面的研究. E-mail: wwqxj6150343@163.com
通讯作者：丁文魁（1970-），男，正高级工程师，主要从事气候变化与农业气象等方面的研究. E-mail: wwqxj.6150343@163.com

变化会影响全流域生态文明建设。近年来，在全球气候变暖和石羊河流域综合治理工程实施的大背景下，石羊河流域的植被环境发生了一定的变化。因此，研究石羊河流域的植被指数演变特征，并预测植被未来发展趋势，将对流域生态环境保护具有重要意义。本文利用2000—2020年石羊河流域遥感数据，对流域NDVI变化趋势进行分析，并探讨NDVI变化对气候变化和人类活动的响应机制，可为石羊河流域植被恢复及生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河之一，位于河西走廊东段，地处青藏高原北坡，南靠祁连山脉，北邻腾格里和巴丹吉林两大沙漠，东接黄土高坡西缘，流域总面积4.16×10^5 km^2，地理位置介于101°06′~104°14′E，37°10′~39°24′N之间，海拔高度在1247~4853 m，自东南向西北倾斜降低，包括上游天祝县、古浪县，中游凉州区、永昌县，下游民勤县(图1)。石羊河流域地处黄土、青藏、蒙新三大高原的交汇过渡带，境内冰川、山地、高山、平原、丘陵、沙漠和戈壁并存，属于大陆性温带干旱、半干旱气候区[23]，由于海拔落差较大，流域内植被和气候要素的空间变化差异较大，年NDVI在0.1201~0.3307、气温在0.7~9.4 ℃、年降水量在120.8~431.1 mm、年日照时数2661.2~3184.8 h、年蒸发量在1549~2620 mm。流域内土壤类型为高山寒漠土、高山草甸土、亚高山草甸土、山地灰褐土、山地黑钙土、山地栗钙土、山地河谷草甸土、灰钙土、荒漠灰钙土、灰棕漠土、龟裂土、风沙土、草甸土、沼泽土、盐土、灌耕土[24]。根据最新监测发现[25]，流域内有绿洲农田、荒漠、荒漠湿地、荒漠湖泊和沙漠等多种生态系统，地表植被覆盖度低，其中，上游南部祁连山区为森林、草地和浅山区灌丛，植被茂密；中游水灌溉区为绿洲，植被适中；下游大部地方为半荒漠、荒漠和沙漠地区，植株稀疏矮小，多为耐干旱灌木、半灌木，生态环境十分脆弱。随着生态文明建设的推进以及2010年开始实施的石羊河流域重点治理工程，石羊河流域植被呈现逐渐恢复态势[26]。

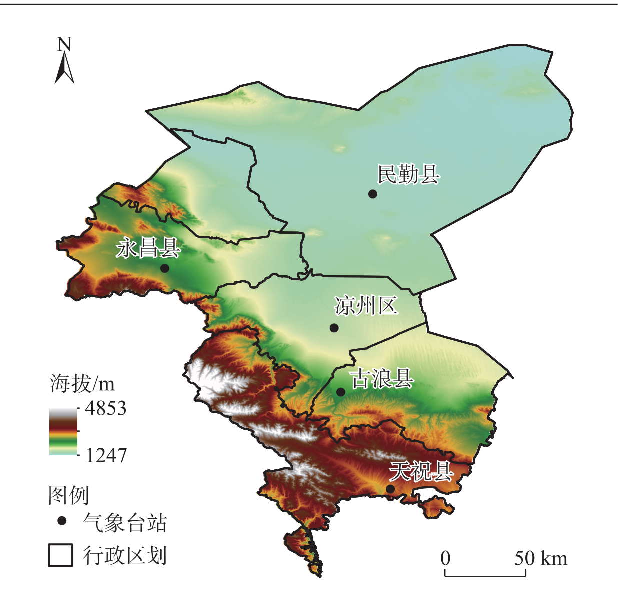


图1 石羊河流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Shiyang River Basin

2 资料和方法

2.1 资料来源

地理空间数据云提供了2000—2020年逐月NDVI数据，空间分辨率为500 m。NDVI数据集消除了云、太阳高度角、仪器视场角、气溶胶、火山喷发的影响，把植被从水和土中分离出来，是监测植被生长状态、植被覆盖度的最佳指标因子[27-29]；气温、降水量、日照时数和蒸发量资料取自石羊河流域民勤县、凉州区、永昌县、古浪县、天祝县5个气象观测站2000—2020年逐月监测数据，资料序列均通过严格质量审核，可信度高。全流域各要素为5个站点的平均，上游各要素为天祝县和古浪县的平均，中游各要素为凉州区和永昌县的平均，下游各要素为民勤县资料。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析法 采用一元线性回归趋势法分析年、季NDVI的变化趋势，计算公式[30]为：

$$x_i = at_i + b, \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n \tag{1}$$

式中：x_i为i年的NDVI；a为趋势斜率；t_i为x_i所对应的时间；b为常数项；n为研究年数。采用宋怡等[31]研究的趋势斜率分级结合研究区域植被变化的实际情况，将NDVI的变化趋势分为7个等级(表1)。

2.2.2 累积距平和信噪比法 突变现象是要素变化过程中存在的某种不连续现象，常用累积距平指标

表1　趋势斜率及等级划分

Tab. 1　Trend slope and grade division

等级	趋势斜率(a)/·a^{-1}
严重退化	$a\leqslant-0.0015$
中度退化	$-0.0015<a\leqslant-0.0010$
轻微退化	$-0.0010<a\leqslant-0.0005$
基本不变	$-0.0005<a\leqslant0.0005$
轻微增长	$0.0005<a\leqslant0.0010$
中度增长	$0.0010<a\leqslant0.0015$
明显增长	$a>0.0015$

来确定,计算公式[32]为：

$$c(t)=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x}) \tag{2}$$

式中：$c(t)$ 为第 t 年累积距平；$\bar{x}$ 为研究时段NDVI平均值。$c(t)$ 绝对值最大时,对应的 t 为转折年。为检验转折是否达到突变标准,计算转折年的信噪比,计算公式为：

$$S/N=\frac{\left|\bar{x}_1-\bar{x}_2\right|}{s_1+s_2} \tag{3}$$

式中：S/N 为信噪比；$\bar{x}_1$、$\bar{x}_2$ 和 s_1、s_2 分别为转折年前后2个阶段NDVI平均值和标准差。当 $S/N\geqslant1$ 时,存在突变现象,最大 S/N 对应年定义为突变年[33]。

2.2.3　相关系数法　运用相关系数法[34]分析了气候因子与NDVI的相关程度,本文筛选出了气温、降水量、日照时数、蒸发量4个与NDVI关系密切因子,计算公式为：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{4}$$

式中：r_{xy} 为相关系数；x_i 为气候因子；y_i 为NDVI；$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x_i 和 y_i 的均值。

2.2.4　多元线性回归模型及贡献率算法　对NDVI与气温、降水量、日照时数和蒸发量做多元线性回归分析,得出NDVI预测值,NDVI预测值视为气候因子对NDVI的影响值,实际遥感观测值减去预测值求得残差,可视为人类活动对NDVI的影响值,计算公式[35]为：

$$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{NA}}=a\times T+b\times P+c\times S+d\times E+e \tag{5}$$

$$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{HA}}=\mathrm{NDVI}_{实}-\mathrm{NDVI}_{\mathrm{NA}} \tag{6}$$

式中：a、b、c、d、e 为模型参数；T、P、S、E 分别为气温、降水量、日照时数、蒸发量；$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{NA}}$ 为气候因子对NDVI的影响值；$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{HA}}$ 为人类活动对NDVI的影响值；$\mathrm{NDVI}_{实}$ 为实测值。

采用金凯等[36]的驱动因子判定标准,定量计算气候因子与人类活动对NDVI贡献率,计算公式为：

$$W_{\mathrm{NA}}=a_{\mathrm{NA}}/a_{实} \tag{7}$$

$$W_{\mathrm{HA}}=a_{\mathrm{HA}}/a_{实} \tag{8}$$

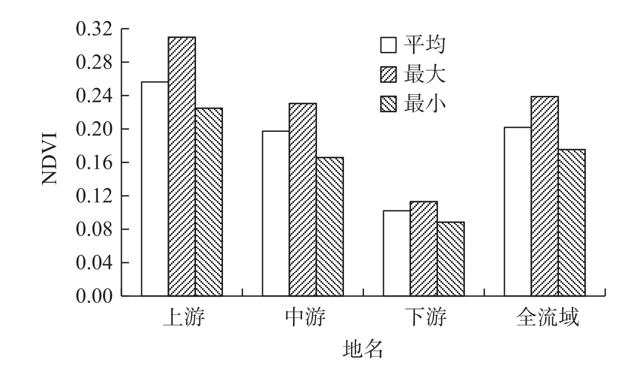
式中：W_{NA} 和 W_{HA} 分别为气候因子和人类活动对NDVI的贡献率；a_{NA}、a_{HA}、$a_{实}$ 分别为 $\mathrm{NDVI}_{\mathrm{NA}}$、$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{HA}}$、$\mathrm{NDVI}_{实}$ 的趋势斜率。

3　结果与分析

3.1　NDVI的时空变化

3.1.1　NDVI的空间分布　石羊河流域植被覆盖的空间变化差异较大(图2),年平均NDVI：全流域0.2019,上游最大0.2563,中游次之0.1974,下游最小0.1021,即NDVI上游>全流域>中游>下游。年NDVI最大和最小值与平均值分布基本一致,上游最大0.3097(2019年),下游最小0.0844(2001年),上、中、下游NDVI最大和最小值相差在0.0246~0.0850。

首先,石羊河流域NDVI的空间分布与海拔高度呈正相关,平均、最大、最小NDVI与海拔高度的相关系数分别达0.9095、0.9202、0.8974,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,相关性很显著。其次,NDVI的空间分布还与所在地理位置和地形地貌关系密切,NDVI上游>中游>下游,主要由于上游处于流域最南端山区,海拔高,多森林、草原,植被覆盖面积大,NDVI自然大；下游处于流域最北端沙漠区,多荒漠戈壁,植被覆盖面积小,NDVI自然小；中游



注：NDVI为归一化植被指数。下同。

图2　石羊河流域NDVI平均和极值的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of NDVI mean and extreme values in Shiyang River Basin

处于流域中段，海拔高度、植被覆盖面积处于居中。海拔高度、地形地貌之所以会对NDVI产生明显影响是因为不同的海拔和地形下气温、降水量等气候因子不同，进而衍生出不同的植被类型，因此，石羊河流域NDVI因地形地貌、气候差异具有明显的区域特征。

3.1.2 NDVI时间变化

（1）NDVI年、季节变化

2000—2020年石羊河流域年NDVI呈现出增长趋势（图3），趋势斜率为上游0.0033·a^{-1}>全流域0.0024·a^{-1}>中游0.0022·a^{-1}>下游0.0008·a^{-1}，均通过了α=0.01显著性水平检验。根据表1的规定，除下游为轻微增长外，全流域及上、中游均为明显增长。

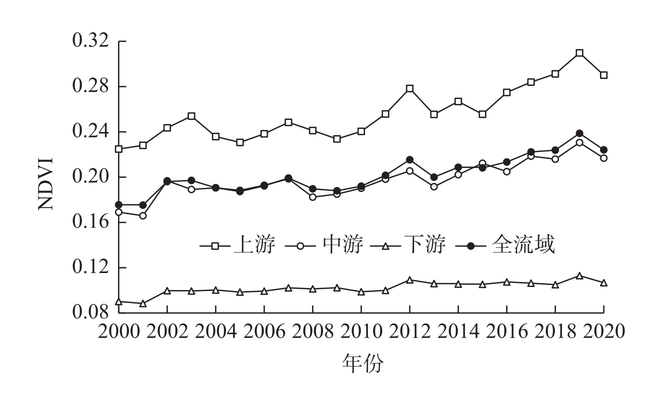


图3 石羊河流域NDVI的年变化

Fig. 3 Annual change of NDVI in Shiyang River Basin

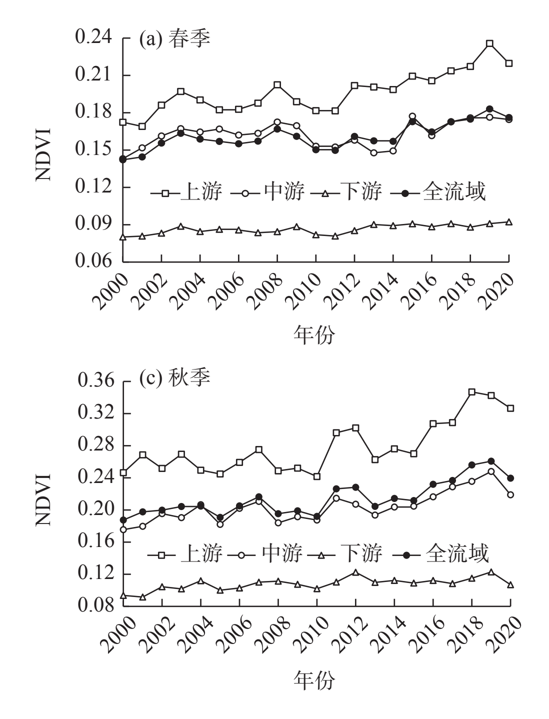
石羊河流域各季节NDVI有明显的季节性差异（表2），最大均在夏季，上游天祝县最大0.5301，最小均在冬季，下游民勤县最小0.0807，全流域及中游永昌县、凉州区和上游古浪县各季节NDVI均居中。

2000—2020年石羊河流域各季节NDVI也呈增长趋势（图4a~d），2011年后全流域各季节NDVI增长明显。由表2可知，流域内各季节趋势斜率基本表现为夏季>秋季>冬季>春季，根据表1的规定，春

表2 石羊河流域各季节NDVI的均值、趋势斜率及增长等级

Tab. 2 Mean values and trend slope and growth grades of NDVI of four seasons in Shiyang River Basin

季节	指标	全流域	上游	中游	下游
春季	多年均值	0.1610	0.1964	0.1629	0.0864
	趋势斜率/·a^{-1}	0.0013	0.0023	0.0008	0.0004
	增长等级	中度增长	明显增长	轻微不变	基本不变
夏季	多年均值	0.3075	0.3964	0.3054	0.1335
	趋势斜率/·a^{-1}	0.0035	0.0043	0.0039	0.0011
	增长等级	明显增长	明显增长	明显增长	中度增长
秋季	多年均值	0.2144	0.2784	0.2037	0.1080
	趋势斜率/·a^{-1}	0.0028	0.0041	0.0024	0.0008
	增长等级	明显增长	明显增长	明显增长	轻微增长
冬季	多年均值	0.1258	0.1567	0.1175	0.0807
	趋势斜率/·a^{-1}	0.0016	0.0019	0.0016	0.0007
	增长等级	明显增长	明显增长	明显增长	轻微增长



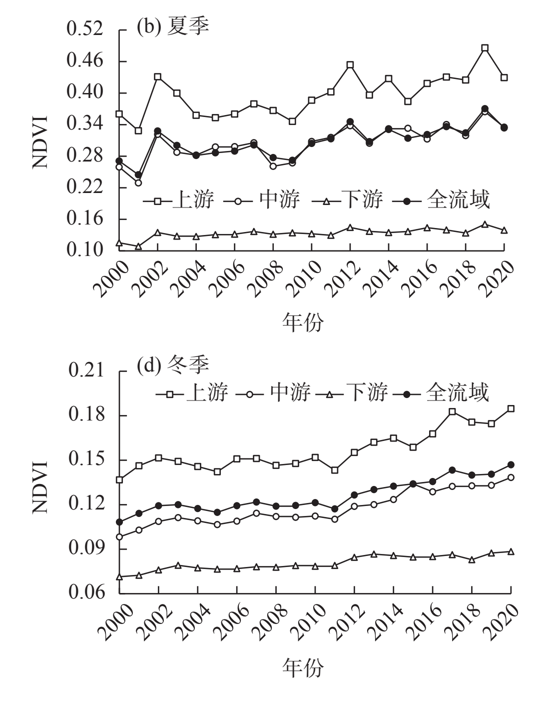


图4 石羊河流域NDVI的季节变化

Fig. 4 Seasonal change of NDVI in Shiyang River Basin

季：全流域中度增长，上游明显增长，中游轻微增长，下游基本不变；夏季：除下游中度增长外，全流域及上、中游明显增长；秋季和冬季：除下游轻微增长外，全流域及上、中游明显增长。全流域及上、中、下游趋势斜率均通过了α=0.01显著性水平检验。

（2）NDVI的突变

采用累积距平法对近21 a石羊河流域年NDVI进行突变分析，发现全流域及上、中、下游年NDVI的变化相对一致（图5）。2000—2010年NDVI呈退化阶段，全流域及上、下游NDVI于2011年后开始呈增长趋势，中游NDVI于2010年后开始呈增长趋势，即2011—2020年为NDVI的增长阶段，2011年全流域及上、下游信噪比最大分别为1.36、1.42、1.27，2010年中游信噪比最大为1.08，均通过了信噪比≥1的检验，其中，突变后与突变前相比，全流域及上、中、下游NDVI分别增加了0.0156、0.0226、0.0234、0.0072。因此，可认为NDVI全流域及上、下游在2011年发生了突变，中游在2010年发生了突变。2011年或2010年后石羊河流域年NDVI显著增长。

3.2 NDVI的驱动因子

3.2.1 气候因子 气候因子对植被活动的影响应为多要素的综合效应特征。为深入分析NDVI的主要气候影响因子，运用相关系数法选取了与NDVI变化密切相关的4个气候因子气温、降水量、日照时数、蒸发量进行多元回归分析。为了更好地比较各个因子在回归方程的重要性，消除了单位的影响，为此在做多元线性回归之前对各因子的值作了标准化变换。多元回归模型建立的具体做法是在Excel中选LINEST函数，然后选择因变量y和自变量x（多个），const和stats中均输入TRUE，同时按Ctrl、Shift和Enter键，就返回了多个附加回归统计值（多元标准化回归系数、系数的标准误差、判定系数、残差平方和等）。并对标准化回归系数的显著性进行t检验，得到了$NDVI_{NA}$的多元线性回归模型及参数（表3）。

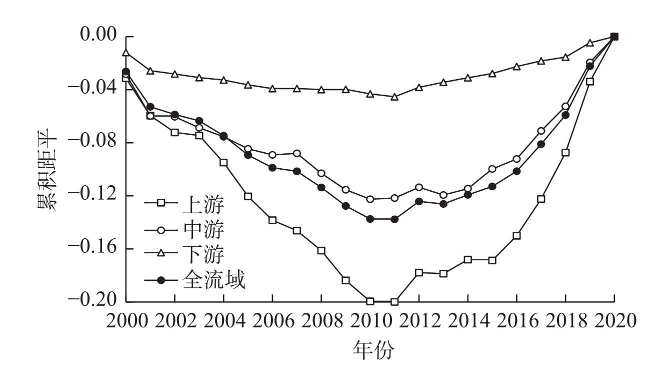


图5 石羊河流域年NDVI的累积距平

Fig. 5 Accumulated anomaly of annual NDVI in Shiyang River Basin

由表3可知，石羊河流域NDVI回归模型的复相关系数在0.58以上，均通过了α=0.01置信水平检验，达到了回归方程的精度验证。全流域及上、下游NDVI与气温、降水量和蒸发量均呈正相关，与日照时数呈负相关，中游NDVI与气温和降水量呈正相关，与日照时数和蒸发量呈负相关。影响全流域及上游NDVI的因子依次为降水量、气温、蒸发量和日照时数；影响中游NDVI的因子依次为降水量、气温、日照时数和蒸发量；影响下游NDVI的因子依次为气温、降水量、蒸发量和日照时数。2000—2020年石羊河流域呈暖湿化趋势，气温升高明显，降水量、蒸发量呈增多趋势，日照时数呈减少趋势，气温升高、降水量和蒸发量增多均促进了植被覆盖增加[37]，但日照时数的增多对植被覆盖增加有一定的遏制作用。因此，通过对气温、降水量、日照时数、蒸发量等气候因子的预报预测，可预测NDVI的未来发展趋势。

利用回归模型计算得到气候因子影响的全流域及上、中、下游$NDVI_{NA}$的年序列，发现2000—2020年石羊河流域年$NDVI_{NA}$呈增长趋势（图6），趋势斜

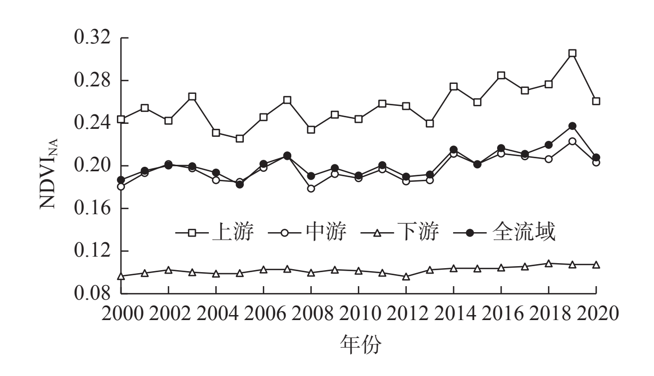
表3 石羊河流域$NDVI_{NA}$的回归模型及参数

Tab. 3 Regression models of $NDVI_{NA}$ and its parameter in Shiyang River Basin

地名	多元回归模型	复相关系数	R^2	置信水平
全流域	$NDVI_{NA}=0.3403^{*}T+0.7706^{***}P-0.1159S+0.3287E$	0.7855	0.6171	0.01
上游	$NDVI_{NA}=0.3513^{*}T+0.8641^{***}P-0.0896S+0.2684E$	0.8084	0.6535	0.01
中游	$NDVI_{NA}=0.5386^{**}T+0.6091^{**}P-0.1172S-0.0339E$	0.7378	0.5443	0.01
下游	$NDVI_{NA}=0.4672^{*}T+0.2678P-0.1281S+0.1958E$	0.5861	0.3436	0.01

注：$NDVI_{NA}$为气候因子对NDVI的影响值；T、P、S、E分别为气温、降水量、日照时数、蒸发量；***、**、*表示标准化回归系数分别通过了α=0.01、0.05、0.1的显著性检验（t检验），由于常数e特别小，略去。

率为上游0.0020·a^{-1}>全流域0.0014·a^{-1}>中游0.0011·a^{-1}>下游0.0004·a^{-1}，均通过了α=0.01显著性水平检验，根据表1的规定，除下游为基本不变外，上游为明显增长，全流域及中游为中度增长。由公式(7)计算出气候因子对全流域及上、中、下游$NDVI_{NA}$贡献率，贡献率为上游>全流域>中游=下游(表4)。



注：$NDVI_{NA}$为气候因子对NDVI的影响值。

图6 石羊河流域$NDVI_{NA}$的年变化

Fig. 6 Annual change of $NDVI_{NA}$ in Shiyang River Basin

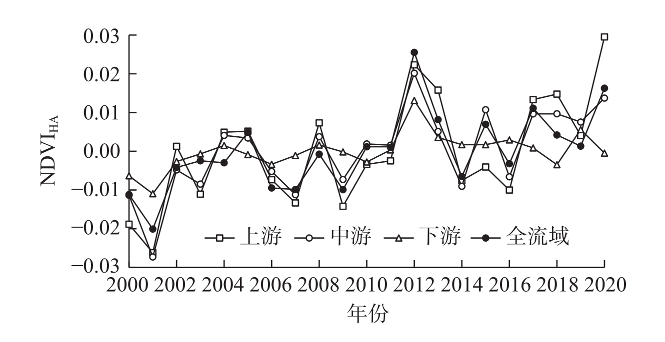
表4 石羊河流域气候因子和人类活动对NDVI的贡献率

Tab. 4 Contribution of climate factors and human activities to NDVI in Shiyang River Basin /%

时段	影响因子	全流域	上游	中游	下游
总时段	气候因子	58.3	60.6	50.0	50.0
	人类活动	41.7	39.4	50.0	50.0
突变前	气候因子	72.6	76.7	66.9	68.7
	人类活动	27.4	23.3	33.1	31.3
突变后	气候因子	56.4	59.9	47.5	48.7
	人类活动	43.6	40.1	52.5	51.3

3.2.2 *人类活动* 利用回归模型和公式(6)求得人类活动影响全流域及上、中、下游$NDVI_{HA}$的年序列，发现2000—2020年石羊河流域年$NDVI_{HA}$也呈增长趋势(图7)，趋势斜率为上游0.0013·a^{-1}>中游0.0011·a^{-1}>全流域0.0010·a^{-1}>下游0.0004·a^{-1}，均通过了α=0.01显著性水平检验，根据表1的规定，除下游为基本不变外，全流域及上、中游均为中度增长。由公式(8)计算出人类活动对全流域及上、中、下游$NDVI_{HA}$的贡献率，贡献率为中游=下游>全流域>上游(表4)。

2000—2009年10 a间全流域及上、中、下游$NDVI_{HA}$基本小于零，只有个别年份大于零，而2010—2020年11 a间全流域及上、中、下游$NDVI_{HA}$基本大于零，只有个别年份小于零，说明$NDVI_{HA}$呈明显增长态势，这一点与3.1.2节的NDVI在2010年或2011年发生突变后呈增长趋势的研究结论一致。



注：$NDVI_{HA}$为人类活动对NDVI的影响值。

图7 石羊河流域$NDVI_{HA}$的年变化

Fig. 7 Annual change of $NDVI_{HA}$ in Shiyang River Basin

由表4可知，全流域及上、中、下游气候因子和人类活动对NDVI的贡献率有一定的差异，突变前气候因子的贡献率明显较大，人类活动的贡献率较小；突变后人类活动的贡献率比突变前明显增大，气候因子的贡献率相对削弱，总体上看，气候因子对石羊河流域NDVI的贡献率大于人类活动。

4 讨论

本文研究了石羊河流域NDVI变化及其驱动因子，对流域的生态环境保护具有重要意义。首先，研究发现石羊河流域NDVI呈明显增长趋势，这与整个中国[38]及邻近的新疆[28]地区的变化相对一致；石羊河流域NDVI在2010年或2011年发生了突变，突变后植被恢复非常明显，这一结论与罗晓玲等[26]、徐晓宁等[39]和任媛等[40]在石羊河流域的研究基本一致，且突变后人类活动的贡献率比突变前明显增大。可能是由于2010年开始实施的石羊河流域综合治理工程，如持续调水工程[35]、退耕还林还草工程[41]、封山禁牧工程[42]等有效保护措施，人类活动对植被的保护和生态修复，对植被恢复有较大的促进作用。总之，石羊河流域植被覆盖变化是气候因子与人类活动共同驱动的结果，表现为气候因子为主，人类活动为辅。其次，本研究还建立了NDVI与气候因子的多元回归预测模型，引入残差值代表人类活动对NDVI的影响，大大降低了气候因子对ND-

VI影响值的偏差[43-44]，对植被覆盖变化及其预测具有较好的指示意义。另外，本研究在气候因子方面仅用了5个国家气象站点的资料，存在站点稀少、分布不均、网格较粗的弊端，且气象站点代表的空间范围有限，其只能反映流域的平均状况，因此，需搜集更多区域气象站资料，更全面、精细地研究气候因子对植被变化的驱动机制，以便更好地揭示石羊河流域植被变化驱动因子的真实情况。

5 结 论

（1）受海拔高度、地形地貌和气候差异的影响，石羊河流域NDVI的空间分布为上游>全流域>中游>下游。

（2）2000—2020年石羊河流域及上、中、下游年NDVI呈增长趋势，趋势斜率为上游>全流域>中游>下游，除下游为轻微增长外，全流域及上、中游为明显增长。全流域及上、中、下游各季节NDVI也呈增长趋势，趋势斜率均表现为夏季>秋季>冬季>春季，夏、秋、冬季基本为明显增长。石羊河流域及上、中、下游年NDVI在2010年或2011年发生了突变。

（3）2000—2020年全流域及上游气候因子对NDVI的贡献率比人类活动大，中、下游气候因子和人类活动对NDVI贡献相当；突变前气候因子的贡献率明显较大，人类活动的贡献率较小；突变后人类活动的贡献率比突变前明显增大，气候因子的贡献率相对削弱。说明石羊河流域植被覆盖变化是气候因子和人类活动共同驱动的结果，气候因子为主要因子，人类活动为辅助因子，全流域及上、中、下游气候因子和人类活动对植被覆盖的贡献率有一定的差异。影响植被变化的主要气候因子依次为降水量、气温、蒸发量、日照时数，气温升高、降水量和蒸发量增多促进了植被覆盖增加，日照时数的增多对植被覆盖增加有一定的遏制作用。

参考文献（References）

[1] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.

[2] Walker B, Steffen W. IGBP Science No.1: A synthesis of GCTE and related research[M]. Stockholm: IGBP, 1997: 1-24.

[3] Fischlin A, Midgley G F, Price J T, et al. Ecosystems, their properties, goods and services[C]//Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group Ⅱ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 211-272.

[4] Faour G, Mhawej M, Nasrallah A, et al. Global trends analysis of the main vegetation types throughout the past four decades[J]. Applied Geography, 2018, 97: 184-195.

[5] 龙爽, 郭正飞, 徐粒, 等. 基于Google Earth Engine的中国植被覆盖度时空变化特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 326-334. [Long Shuang, Guo Zhengfei, Xu Li, et al. Spatiotemporal variations of fractional vegetation coverage in China based on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 326-334.]

[6] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于GEE云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-1450. [Li Jing, Yan Xingguang, Yan Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1439-1450.]

[7] Nautiyal M C, Nautiyal B P, Vinay P. Effect of grazing and climatic changes on alpine vegetation of Tungnath, Garhwal Himalaya, India[J]. The Environmentalist, 2001, 24: 125-134.

[8] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106(D17): 20069-20083.

[9] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.

[10] Ma M G, Wang J, Wang X M. Progress of the relationship between the interannual variation of vegetation and climate based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 421-431.

[11] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥, 等. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji, et al. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]

[12] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近20年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学(C辑), 2003, 33(6): 554-565. [Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. Vegetation activity has increased in China in the past 20 years[J]. Science in Chinese (Series C), 2003, 33(6): 554-565.]

[13] 戴声佩, 张勃, 王强, 等. 祁连山草地植被NDVI变化及其对气温降水的旬响应特征[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1769-1776. [Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Qiang, et al. Variation in grassland vegetation NDVI and its ten-day response to temperature and precipitation in the Qilian Mountains[J]. Resource Science, 2010, 32(9): 1769-1776.]

[14] 王志鹏, 张宪洲, 何永涛, 等. 2000—2015年青藏高原草地归一化植被指数对降水变化的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 75-83. [Wang Zhipeng, Zhang Xianzhou, He Yongtao, et al. Responses of normalized difference vegetation index (NDVI) to precipitation changes on the grassland of Tibetan Plateau from 2000 to 2015[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 75-83.]

[15] 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2000年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 292-301. [Zhao Qianqian, Zhang Jingpeng, Zhao Tianbao, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000 [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 292-301.]

[16] 陈婉佳, 刘蓉蓉, 何政伟. 基于MODIS的植被指数变化研究及其与气候因子的关系分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38 (9): 77-80. [Chen Wanjia, Liu Rongrong, He Zhengwei. The research of MODIS vegetation indices and the relationship with meteorological factors[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(9): 77-80.]

[17] 薛宇轩, 卢宏玮. 青藏高原植被覆盖变化及气候驱动因子分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 44-48. [Xue Yuxuan, Lu Hongwei. Analysis of vegetation cover change and climate driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(15): 44-48.]

[18] 艾丽亚, 王永芳, 郭恩亮, 等. 基于GEE的大青山国家级自然保护区NDVI变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1279-1290. [Ai Liya, Wang Yongfang, Guo Enliang, et al. NDVI change and its influencing factors of Daqingshan National Nature Reserve based on GEE[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1279-1290.]

[19] 颉耀文, 陈发虎. 基于数字遥感图像的民勤绿洲20年变化研究[J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 69-74. [Jie Yaowen, Chen Fahu. Study on the change of Minqin oasis since recent twenty years based on digital RS images[J]. Arid Zone Research, 2002, 19(1): 69-74.]

[20] 李忆春, 陈发虎. 民勤盆地水资源可持续利用对策——2000年民勤水资源利用调查[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 465-469. [Li Yichun, Chen Fahu. Water resources sustainable utilization countermeasures in Minqin Basin of Gansu Province: Minqin resources utilization survey in 2000[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(5): 465-469.]

[21] 韩涛, 王大为. 2000—2014年石羊河流域植被覆盖变化研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(13): 66-74. [Han Tao, Wang Dawei. Change of vegetation coverage in Shiyang River Basin 2000—2014 [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(13): 66-74.]

[22] 张立峰. 西北生态环境脆弱区典型内陆河流域植被覆盖变化及其影响因素研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017. [Zhang Lifeng. Vegetation cover change and influencing factors in northwest ecological environment fragile area China[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.]

[23] 白肇烨, 徐国昌, 孙学筠, 等. 中国西北天气[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 258-357. [Bai Zhaoye, Xu Guochang, Sun Xuejun, et al. Weather over northwest China[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991: 258-357.]

[24] 高安. 石羊河流域的土壤类型[J]. 中国沙漠, 1984, 4(3): 26-35. [Gao An. Soil type in the Shiyang River Valley[J]. Journal of Desert Research, 1984, 4(3): 26-35.]

[25] 毛忠超, 李森, 张志山, 等. 荒漠-过渡带-绿洲界定——以石羊河流域为例[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 177-184. [Mao Zhongchao, Li Sen, Zhang Zhishan, et al. Desert-ecotone-oasis division: Taking the Shiyang River Basin as an example[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 177-184.]

[26] 罗晓玲, 杨梅, 李岩瑛, 等. 基于NDVI的石羊河流域植被演变特征及其对沙尘暴的影响分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 84-91. [Luo Xiaoling, Yang Mei, Li Yanying, et al. Analysis on characteristics of vegetation evolution and its impact on sandstorm in Shiyang River Basin based on NDVI[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 84-91.]

[27] 郑倩, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区解放闸灌域植被指数与地下水埋深的定量关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 301-306, 313. [Zheng Qian, Shi Haibin, Li Xianyue, et al. Study of quantitative relationship between vegetation index and groundwater depth in Jiefangzha irrigation area in the Hetao irrigation district[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 301-306, 313.]

[28] 白旭阳, 刘昱坤, 杨武超, 等. 新疆玛纳斯河流域植被变化的特征与归因[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 192-197, 210. [Bai Xuyang, Liu Yukun, Yang Wuchao, et al. Characteristics and attribution of vegetation change in Manas River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 192-197, 210.]

[29] 方健梅, 马国青, 余新晓, 等. 青海湖流域NDVI时空变化特征及其与气候之间的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 105-112. [Fang Jianmei, Ma Guoqing, Yu Xinxiao, et al. Spatiotemporal change of NDVI in Qinghai Lake Basin and its relationship with climate factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 105-112.]

[30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[31] 宋怡, 马明国. 基于SPOT VEGETATION数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-93. [Song Yi, Ma Mingguo. Study on the vegetation cover change in northwest China based on SPOT VEGETATION data[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 89-93.]

[32] 庞静. 基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016. [Pang Jing. Geographical detector-based identifying the impact of natural and human factors on vegetation changes[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.]

[33] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析[J]. 气象, 1995, 21(7): 54-57. [Huang Jiayou. Climate change trend and mutation analysis

[J]. Meteorological Monthly, 1995, 21(7): 54-57.]
[34] 肖建勇, 王世杰, 白晓永, 等. 喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 138-151. [Xiao Jianyong, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of south China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 138-151.]
[35] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 11-21. [Yin Zhenliang, Feng Qi, Wang Lingge, et al. Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000—2019[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 11-21.]
[36] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]
[37] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 205-212. [Sun Gaopeng, Liu Xianfeng, Wang Xiaohong, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001—2020[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 205-212.]
[38] 陈淑君, 许国昌, 吕志平, 等. 中国植被覆盖度时空演变及其对气候变化和城市化的响应[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 742-752. [Chen Shujun, Xu Guochang, Lü Zhiping, et al. Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover and its response to climate change and urbanization in China[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 742-752.]
[39] 徐晓宁, 郭萍, 张帆, 等. 政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 185-191. [Xu Xiaoning, Guo Ping, Zhang Fan, et al. Analysis for changing ecological effects under policy-driven in Shiyang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 185-191.]
[40] 任媛, 刘普幸. 基于EVI和MNDWI指数的石羊河流域水体、植被时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 853-861. [Ren Yuan, Liu Puxing. Temporal and spatial variations of water and vegetation in Shiyang River Basin based on EVI and MNDWI[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 853-861.]
[41] 李依璇, 朱清科, 石若莹, 等. 2000—2018年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 60-68. [Li Yixuan, Zhu Qingke, Shi Ruoying, et al. Spatial and temporal changes of vegetation cover and its influencing factors in the Loess Plateau from 2000 to 2018[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(4): 60-68.]
[42] 张建香, 胡爱萍, 张多勇. 陕甘宁黄土高原区植被覆盖空间格局演变[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 71-76. [Zhang Jianxiang, Hu Aiping, Zhang Duoyong. Vegetation coverage variation in Loess Plateau area of Shaanxi-Gansu-Ningxia[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition), 2021, 57(5): 71-76.]
[43] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dry land degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57: 535-554.]
[44] 刘宁, 彭守璋, 陈云明. 气候因子对青藏高原植被生长的时间效应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(1): 18-26. [Liu Ning, Peng Shouzhang, Chen Yunming. Temporal effects of climate factors on vegetation growth on the Qinghai Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(1): 18-26.]

Normalized difference vegetation index change and its driving factors in Shiyang River Basin

YANG Xiaoling[1,2], DING Wenkui[1], ZHOU Hua[1], LI Yanying[1], CHEN Haibei[3]

(1. Wuwei National Climate Observation Platform, Wuwei 733099, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Gulang County Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733100, Gansu, China)

Abstract: The problem of land desertification is serious, and, in this regard, the ecological environment has shown great frailty in Shiyang River Basin, Gansu Province, China. Studying the driving factors of vegetation cover is thus of great significance for ecological environment protection in the river basin. Using monthly NASA GIMMS normalized difference vegetation index (NDVI), temperature, precipitation, sunshine, and evaporation data in Shiyang River Basin from 2000 to 2020, change characteristics and driving factors of NDVI were analyzed using trend slopes, cumulative distances and signal-to-noise ratios, correlation coefficients, and multiple regressions. The results were as follows: (1) The spatial distribution of NDVI in Shiyang River Basin followed the trend of upper reaches>whole river basin>middle reaches>lower reaches because of the influence of altitude, landform, and climate difference. (2) The annual NDVI showed an obviously increasing trend in the whole river basin and its upper and middle reaches, and a slightly increasing trend in the lower reaches. The slope trend followed upper reaches>whole river basin>middle reaches>lower reaches. The NDVI of four seasons also showed growth trends, with the slope trend being summer>autumn>winter>spring, with summer, autumn, and winter basically having significant growth. A mutation of the NDVI of whole river basin and its upper, middle, and lower reaches occurred in 2010 or 2011. (3) The climate factors that affected the NDVI change were precipitation, temperature, evaporation, and sunshine hours. In turn, temperature, precipitation, and evaporation positively contributed to NDVI, whereas sunshine duration had a negative contribution to NDVI. NDVI change was a result of combined climate change and human activities in Shiyang River Basin. The contribution of climate factors to NDVI was greater than that of human activities in the whole river basin and its upper reaches, whereas the contributions of climate factors and human activities to NDVI were equal in the middle and lower reaches. The contribution rate of human activities increased significantly after mutation, whereas the contribution rate of climate factors was relatively weakened. This study provides a scientific basis for vegetation restoration and ecological environment protection in Shiyang River Basin.

Key words: NDVI; trend slope; driving factor; multiple regression; Shiyang River Basin